

302/114-0
(im SdT erwähnt)

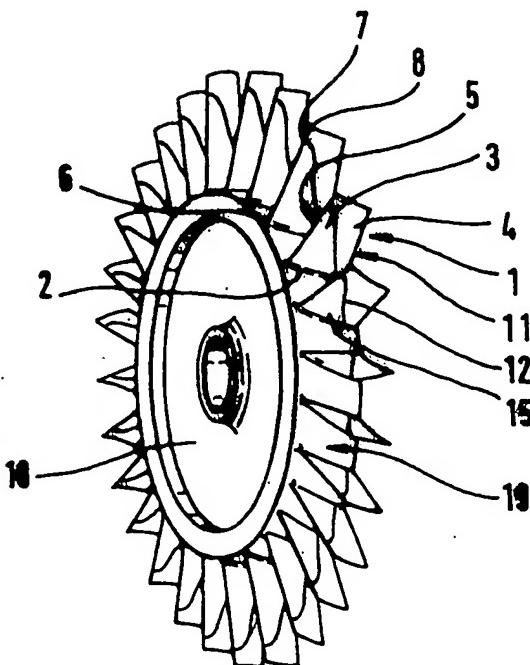


PCT

WELTOORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro

INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation ⁶ : F01D 5/28, 5/14, 5/34		A1	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 99/27234 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 3. Juni 1999 (03.06.99)
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE98/03375</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 17. November 1998 (17.11.98)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: 197 51 129.5 19. November 1997 (19.11.97) DE</p> <p>(71) Anmelder (<i>für alle Bestimmungsstaaten ausser US</i>): MTU MOTOREN- UND TURBinen-UNION MÜNCHEN GMBH [DE/DE]; Postfach 50 06 40, D-80976 München (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (<i>nur für US</i>): ROSSMANN, Axel [DE/DE]; Bachweg 4, D-85757 Karlsfeld (DE). SIKORSKI, Siegfried [DE/DE]; Rathgeberstrasse 1, D-80997 München (DE). KRÜGER, Wolfgang [DE/DE]; Waldstrasse 11, D-85293 Reichertshausen (DE).</p>		<p>(81) Bestimmungsstaaten: JP, RU, UA, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht. Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen Frist; Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen eintreffen.</i></p>	
<p>(54) Title: ROTOR WITH INTEGRATED BLADING</p> <p>(54) Bezeichnung: ROTOR MIT INTEGRALER BESCHAUFELUNG</p> <p>(57) Abstract</p> <p>The invention relates to a rotor with integrated blading, especially for a propulsion unit on which rotor blades are arranged circumferentially and extend in an essentially radial manner. In order to reduce vibrations, the rotor blades comprise a metallic blade footing, a metallic blade pan section, said section at least constructing a part of the blade fore-edge and the area of the blade surface which is adjacent to said blade fore-edge, and a blade pan made of fiber reinforced plastic.</p> <p>(57) Zusammenfassung</p> <p>Die Erfindung betrifft einen Rotor mit integraler Beschaufelung, insbesondere für ein Triebwerk, an dem umfanglich und sich im wesentlichen radial erstreckend Rotorschaufeln angeordnet sind, wobei die Rotorschaufel zur Verringerung von Schwingungen einen metallischen Schaufelfuss, einen metallischen Schaufelblattschnitt, der wenigstens einen Teil der Schaufelvorderkante und des daran angrenzenden Bereichs der Schaufelfläche bildet, und ein Schaufelblatt aus faserverstärktem Kunststoff aufweisen.</p>			



LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Amenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidschan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauritanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

Rotor mit integraler Beschaufelung

Die Erfindung betrifft einen Rotor mit integraler Beschaufelung, insbesondere für ein Triebwerk, an dem umfänglich und sich im wesentlichen radial erstreckend 5 Rotorschaufeln angeordnet sind.

Bekannte Fan-Rotorschaufeln aus faserverstärktem Kunststoff besitzen einen verhältnismäßig großen Durchmesser von z.B. 3,2 m und werden in Vollbauweise mit integriertem Schwabenschwanzfuß oder in Hohlbauweise mit einem 10 Innenstück, sog. Spar, gefertigt. Bei Schaufelblättern bringt der Einsatz von faserverstärktem Kunststoff anstelle von Metall den Vorteil einer erheblichen Gewichtseinsparung. Die beschriebene Bauweise ist jedoch nicht für kleinere Fan-Rotorschaufeln mit höheren Umfangsgeschwindigkeiten geeignet, da sie bei diesen der vorgeschriebenen Vogelschlagbeanspruchung nicht standhält. 15 Um den Gewichtsvorteil dennoch zu nutzen, wird ein Schaufelblatt aus faserverstärktem Kunststoff in einer metallischen Haltegabel am Schaufelfuß befestigt. Diese Hybridbauweise hat den Nachteil, daß bei Vogelschlag mangels Duktilität zu große Teile der Kunststoffschaufelblätter abbrechen können und danach die erforderliche Notleistung vom Triebwerk nicht mehr erbracht werden kann. Zudem ist die zur Schaufelvorder- und Schaufelhinterkante offene 20 Haltegabel torsionsweich. Ferner ist das Schaufelblatt nicht gegen Erosion geschützt.

Aus der DE-OS 20 42 665 ist eine Verdichterschaufel bekannt, die ein das Eintrittskantenprofilteil der Schaufel bildendes Metallteil und ein den übrigen Teil des Tragflächenprofils bildendes, Fasern enthaltendes Verbundteil umfaßt, wobei das Verbundteil in einer Nut des Metallteils aufgenommen ist und das Metallteil einen Schaft zur lösbar Verbindung der Verdichterschaufel mit einem Laufrad aufweist. 25

Die DE 195 35 713 A 1 offenbart eine Verbundschaufel, bei denen die Hinterkante zur Verringerung von Materialverlusten an der Hinterkante abschnittsweise mit einer metallischen Ummantelung überdeckt ist.

- 5 Aus der DE 26 31 856 C2 ist eine Verdichterschaufel aus einem Verbundmaterial bekannt, bei der das Fasermaterial zumindest an der Vorderseite teilweise mit einem metallischen Kantenschutz geschützt ist, wobei die Verdichterschaufel einen Schwalbenschwanz zur lösbarer Befestigung an einem Rotor bzw. Läufer aufweist.

10

Die US 3,883,267 offenbart eine Schaufel für eine Gasturbine mit einem metallischen, kurvenförmig gestalteten Kern, um den ein Schaufelblattabschnitt aus faserverstärktem Material ausgebildet ist.

- 15 Die Rotorschaufeln werden im allgemeinen lösbar an der Umfangsfläche eines Rotorträgers befestigt, z.B. mit einem Schwalbenschwanz. Dabei werden die im Betrieb auftretenden Schwingungen durch die Reibung zwischen dem Schwalbenschwanz am Schaufelfuß und der entsprechenden Nut in dem Rotorträger gedämpft. Bei integral beschauften Rotoren fehlt eine solche
20 Dämpfung, so daß die im Betrieb auftretenden Schwingungen und die Kerbwirkung aufgrund von aufgetretenen Fehlstellen am Schaufelblatt, wie z.B. Rissen, ein Problem darstellen.

- Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Rotor mit integraler Beschau-
25 felung der eingangs beschriebenen Gattung zu schaffen, bei dem die im Be-trieb auftretenden Schwingungen verringert werden. Dazu soll die Beschau-felung auch ein möglichst geringes Gewicht aufweisen.

- Die Lösung der Aufgabe ist erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, daß die
30 Rotorschaufeln einen metallischen Schaufelfuß, einen metallischen Schaufel-blattabschnitt, der wenigstens einen Teil der Schaufelvorderkante und des

daran angrenzenden Bereich der Fläche bildet, und ein Schaufelblatt aus faserverstärktem Kunststoff aufweisen.

- Der Vorteil besteht darin, daß solche Rotorschaufeln durch den Einsatz von faserverstärktem Kunststoff einerseits deutliche Gewichtsvorteile gegenüber Metallschaufeln haben, andererseits durch den sich entlang wenigstens eines Teils der Schaufelvorderkante und des daran angrenzenden Bereichs der Schaufelfläche erstreckenden, metallischen Schaufelblattabschnitt eine erhöhte Duktilität sowie einen Schutz gegen Erosion aufweisen. Zudem besitzen die Rotorschaufeln eine gute Schwingungsdämpfung. Sie sind insbesondere im Nabenhochbereich aufgrund des metallischen Schaufelblattabschnitts robust und lassen sich bei einem erfolgten Bruch auf einfache Weise durch Austausch des Kunststoffschaufelblatts reparieren. Aufgrund der guten Dämpfung bei den erfindungsgemäß beschauften Rotoren, wie insbesondere Verdichterrotoren oder Fan-Rotoren, kann bei im Betrieb auftretenden Fehlstellen an den Schaufelblättern, z.B. Rissen, eine größere Kerbwirkung zugelassen werden. Infolgedessen muß ein Rotor bzw. dessen Rotorschaufel im Vergleich zu herkömmlichen Rotoren bei normalem Verschleiß seltener repariert werden.
- Es ist bevorzugt, daß der metallische Schaufelblattabschnitt die Schaufelvorderkante radial innen am Schaufelfuß beginnend und mit Abstand zu einem radial äußeren Ende der Schaufelvorderkante bzw. der Schaufelfläche endend bildet. Auf diese Weise sind die Rotorschaufeln an dem an der Schaufelvorderkante liegenden Staupunkt der Strömung sowie an den sich beidseits daran anschließenden Bereichen der Schaufelfläche, die ebenfalls umströmt werden, geschützt.
- Es ist ferner bevorzugt, daß der metallische Schaufelblattabschnitt einen Schlitz aufweist, in dem das Schaufelblatt aus faserverstärktem Kunststoff gehalten ist.

Es ist vorteilhaft, daß sich der Schlitz vollständig über einen Endabschnitt mit z. B. kurvenförmigem Verlauf von einem auf der Schaufelvorderkante liegenden, ersten Ende bis zu einem axial weiter hinten und mit Abstand zur Schaufelvorderkante liegenden, zweiten Ende des metallischen Schaufelblattabschnitts erstreckt.

Es kann zweckmäßig sein, daß das Schaufelblatt aus faserverstärktem Kunststoff durch Kleben und/oder Nieten an dem metallischen Schaufelblattabschnitt befestigt ist.

10

Weiterhin ist bevorzugt, daß der Schaufelfuß und/oder der Schaufelblattabschnitt aus einer Titanlegierung bestehen.

15

Höchst bevorzugt sind eine Vielzahl von Fan-Rotorschaufeln an einer Verdichterscheibe umfänglich, äquidistant und sich im wesentlichen radial erstreckend unter Bildung einer integral beschauften Verdichterscheibe, sog. „Blisk“, angeordnet. Die Fan-Rotorschaufeln werden dabei durch Reibschweißen od.dgl. an der Scheibe unter Bildung eines einstückigen Bauteils befestigt. Hierdurch wird Gewicht eingespart, was sich positiv auf die Dämpfung sowie die Größe der Drehzahlen auswirkt.

20

Bevorzugt ist ein umfänglich beschauelter Rotorträger eine Verdichterscheibe, wobei dieser alternativ auch ein Verdichterring sein kann.

25

Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Im folgenden wird die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf eine Zeichnung näher erläutert. Es zeigt:

30

Fig. 1 eine schematische Ansicht in perspektivischer Darstellung eines

Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Rotors,

Fig. 2 eine schematische Ansicht in perspektivischer Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Fan-Rotorschaufel des erfindungsgemäßen Rotors und

Fig. 3 eine Schnittansicht der Fan-Rotorschaufel aus Fig. 2.

Fig. 1 zeigt ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Rotors, z.B. ein Verdichterrotor, mit integraler Beschaufelung für ein Flugtriebwerk, bei dem ein Rototräger 18 eine Verdichterscheibe ist, an deren Umfangsfläche 19 eine Vielzahl von sich im wesentlichen radial erstreckenden Rotorschaufeln 1 befestigt sind. Die Rotorschaufeln 1 umfassen jeweils einen metallischen Schaufelblattabschnitt 3 und ein Schaufelblatt 4 aus faserverstärktem Kunststoff.

Der metallische Schaufelblattabschnitt 3 und die Verdichterscheibe 18 können z.B. aus dem Vollen gefräst oder zunächst separat hergestellt und dann durch ein geeignetes Verfahren integral miteinander verbunden werden. Dazu bietet sich u.a. Induktionsschweißen mit hochfrequentem Strom an, bei dem in der Fügeebene zwischen der Verdichterscheibe 18 und der Rotorschaufel 1 ein Schmiedegefüge entsteht.

Der metallische Schaufelblattabschnitt 3 bildet bei der Ausgestaltung gemäß Fig. 1 wenigstens einen Teil einer Schaufelvorderkante 5 und eines daran angrenzenden Bereichs einer Schaufelfläche 15. Ein Endabschnitt 12 des metallischen Schaufelblattabschnitts 3 besitzt vorliegend einen kurvenförmigen Verlauf, der so ausgelegt ist, der auch bei einem Bruch und etwaigen Wegfall des Schaufelblatts 4 aus faserverstärktem Kunststoff eine vorgeschriebene Notleistung des Triebwerks gewährleistet ist.

Fig. 2 zeigt eine im ganzen mit 1 bezeichnete Rotorschaufel in Hybridbauweise, die vorliegend eine Fan-Rotorschaufel eines Fan-Rotors ist und bspw. in

einem Triebwerk mit einem Durchmesser von etwa 1,5 m eingesetzt wird. Die Fan-Rotorschaufel 1 besteht im wesentlichen aus einem metallischen Schaufelfuß 2, einem metallischen Schaufelblattabschnitt 3 sowie einem Schaufelblatt 4 aus faserverstärkten Kunststoff. Der Schaufelfuß 2 und der metallische

5 Schaufelblattabschnitt 3 sind einstückig ausgebildet und bestehen aus einer Titanlegierung. Der Schaufelfuß 2 ist lediglich beispielhaft und wird bei der integralen Befestigung der Fan-Schaufeln 1 an einem Rotorträger 18 hinsichtlich seiner Form geeignet ausgebildet. Zur Verstärkung des Kunststoffschaufelblatts 4 lassen sich unterschiedliche Fasern, wie z.B. C-Fasern, Glasfasern

10 oder Aramidfasern, verwenden.

Der metallische Schaufelblattabschnitt 3 bildet einen Teil einer Schaufelvorderkante 5, indem er sich von einem radial inneren Ende 6 der Schaufelvorderkante 5, d.h. radial am Schaufelfuß 2 beginnend, bis zu einem ersten Ende 15 des Schaufelblattabschnitts 3 erstreckt, das mit Abstand zu einem radial äußeren Ende 8 der Schaufelvorderkante 5 bzw. der Schaufelfläche 15 endet. Der metallische Schaufelblattabschnitt 4 erstreckt sich vorliegend über ungefähr 9/10 der Länge der Schaufelvorderkante 5, wobei Versuche gezeigt haben, daß 2/3 der Länge der Schaufelvorderkante 5 ein bevorzugter Wert ist.

20 Auf diese Weise wird die der Strömung zugewandte Schaufelvorderkante 5, an welcher der Staupunkt der die Fan-Rotorschaufel 1 umströmenden Strömung liegt, ausreichend gegen Erosion und Vogelschlag geschützt. Ferner ist die radiale Höhe des metallischen Schaufelblattabschnitts 3 so ausgelegt, daß selbst bei vollständig abgebrochenem Kunststoffschaufelblatt 4 das vorgeschriebene Betriebsverhalten des Triebwerks gewährleistet ist und eine Notleistung erbracht wird.

Wie in Fig. 2 zu erkennen ist, erstreckt sich der metallische Schaufelblattabschnitt 3 beginnend von dem radial inneren Ende 6 der Schaufelvorderkante 5 nicht über die gesamte Breite der Schaufelfläche 15 bis zu einem radial inne-

ren Ende 10 einer Schaufelhinterkante 11, sondern endet mit Abstand dazu an seinem zur Schaufelvorderkante 5 beabstandeten, zweiten Ende 9.

Da der metallische Schaufelblattabschnitt 3 aus einer Titanlegierung besteht,
5 besitzt die Fan-Rotorschaufel 1 eine ausreichende Duktilität und ist insbesondere bei Vogelschlag im Nabenhörnchen robust. Weil die Schaufelfläche 15 darüber hinaus überwiegend von dem Schaufelblatt 4 aus faserverstärkten Kunststoff mit einer Dichte von etwa $1,6 \text{ g/cm}^3$ gebildet ist, während die Titanlegierung eine Dichte von etwa $4,5 \text{ g/cm}^3$ aufweist, besitzt die Fan-Rotorschaufel 1
10 ein verhältnismäßig geringes Gewicht und ist auch für Triebwerke mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten geeignet.

Ein sich zwischen dem ersten Ende 7 und dem zweiten Ende 9 des metallischen Schaufelblattabschnitts 3 erstreckende Endabschnitt 12 besitzt vorliegend einen kurvenförmigen Verlauf. Da die vorliegende Fan-Rotorschaufel 1 nach den üblichen Kriterien für Fan-Schaufeln ausgelegt wird, kann dieser Endabschnitt 12 auch einen daran angepaßten anderen Verlauf aufweisen. Es soll jedoch stets gewährleistet sein, daß der metallische Schaufelblattabschnitt 3 auch bei vollständigen Bruch und mithin Wegfall des Schaufelblatts 4 aus faserverstärktem Kunststoff eine vorgeschriebene Notleistung des Triebwerks gewährleistet.
15
20

Ein in Fig. 2 gestrichelt angedeuteter Fügebereich 13 ist in der Schnittansicht gemäß Fig. 3 deutlicher zu erkennen. Der Fügebereich 13 wird von einem
25 Schlitz 14 in dem metallischen Schaufelblattabschnitt 3 gebildet, in den das Schaufelblatt 4 eingesetzt und durch Kleben oder ein anderes geeignetes Verbindungsverfahren befestigt ist. Die beiden Flanken 16, 17 des Schlitzes 14 können je nach Auslegung unterschiedlich lang sein. Der Schlitz 14 erstreckt sich von dem auf der Schaufelvorderkante 5 liegenden, ersten Ende 7 bis zum
30 zur Schaufelvorderkante 5 beabstandeten, zweiten Ende 9 des metallischen Schaufelblattabschnitts 3 über die gesamte, im wesentlichen radial verlaufende

de Länge des metallischen Schaufelblattabschnitts 3. Das zweite Ende 9 des metallischen Schaufelblattabschnitts 3 kann je nach Anwendungsfall auch radial weiter außen oder auf der Schaufelhinterkante 11 liegen. Die am Beispiel der Fan-Rotorschaufel 1 beschriebene Merkmale gelten in gleicher Weise für
5 alle anderen Rotorschaufeln.

10

15

20

25

30

Patentansprüche

1. Rotor mit integraler Beschaufelung, insbesondere für ein Triebwerk, an dem umfänglich und sich im wesentlichen radial erstreckend Rotorschaufeln (1) angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß die Rotorschaufeln (1) einen metallischen Schaufelfuß (2), einen metallischen Schaufelblattabschnitt (3), der wenigstens einen Teil der Schaufelvorderkante (5) und des daran angrenzenden Bereichs der Schaufelfläche (15) bildet, und ein Schaufelblatt (4) aus faserverstärktem Kunststoff aufweisen.
10
2. Rotor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der metallische Schaufelblattabschnitt (3) die Schaufelvorderkante (5) radial innen am Schaufelfuß (2) beginnend und mit Abstand zu einem radial äußeren Ende (8) der Schaufelvorderkante (5) endend bildet.

- 15
3. Rotor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der von dem metallischen Schaufelblattabschnitt (3) gebildete Bereich der Schaufelflächen (15) so groß ist, daß bei abgebrochenem Schaufelblatt (4) aus faserverstärktem Kunststoff eine Notleistung vom Triebwerk erbracht wird.

- 20
4. Rotor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der metallische Schaufelblattabschnitt (3) einen Schlitz (13) aufweist, in dem das Schaufelblatt (4) aus faserverstärktem Kunststoff gehalten ist.

- 25
5. Rotor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß sich der Schlitz (14) von einem auf der Schaufelvorderkante (5) liegenden, ersten Ende (7) bis zu einem zur Schaufelvorderkante (5) beabstandeten, zweiten Ende (9) des metallischen Schaufelblattabschnitts (3) erstreckt.
30

6. Rotor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Schaufelblatt (4) aus faserverstärktem Kunststoff durch Kleben und/oder Nieten an dem metallischen Schaufelblattabschnitt (3) befestigt ist.

5

7. Rotor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet ist, daß das Schaufelblatt (4) aus faserverstärktem Kunststoff durch Klemmen an dem metallischen Schaufelabschnitt (3) befestigt ist.

10

8. Rotor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der metallische Schaufelfuß (2) und/oder der metallischen Schaufelblattabschnitt (3) aus einer Titanlegierung bestehen.

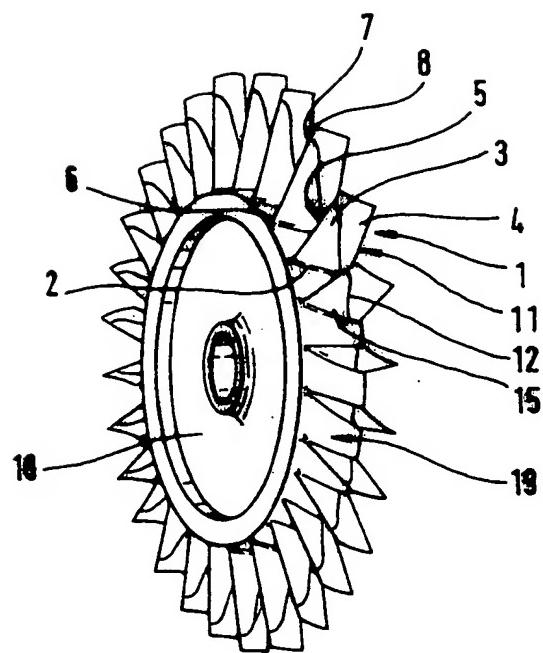
15

9. Rotor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein mit den Rotorschaufeln (1) beschaufelter Rotorträger (18) eine Verdichterscheibe oder ein Verdichterring ist.

20

10. Rotor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Rotorschaufeln (1) mittels Induktionsschweißen mit hochfrequentem Strom unter Bildung eines Schmiedegefüges in der Fügeebene integral am Rotor befestigt sind.

Fig. 1



2 / 2

Fig. 2

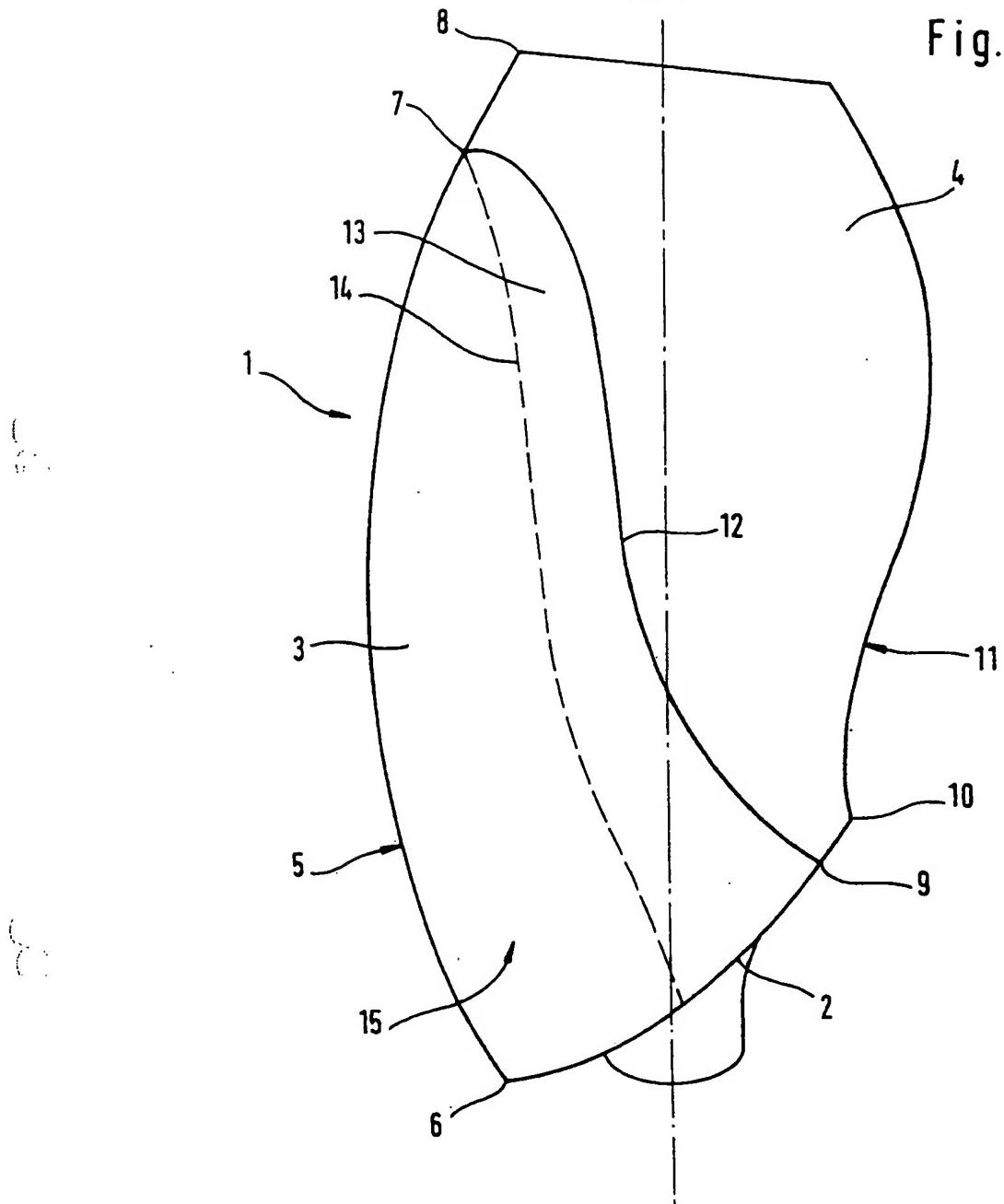


Fig. 3

